

## 荷電流体の自己組織現象に関する研究

著者	鈴木 誠
号	821
発行年	1980
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/9557">http://hdl.handle.net/10097/9557</a>

氏 名	すずき まこと 鈴 木 誠
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 56 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	荷電流体の自己組織現象に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 沢田 康次
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 沢田 康次      東北大学教授 武内 義尚 東北大学教授 佐藤 徳芳

## 論 文 内 容 要 旨

### 第一章 緒 論

流体が電界と相互作用する時，様々な現象が起きる。応用面においても，流体を電氣的に制御する際に種々の問題が生じる。たとえば，イオン・ドラッグ・ポンピングにおける不安定性，振動現象，あるいはポンプ圧の異常低下現象，液晶における電気対流の発生や対流構造の逐次相転移現象，高電界における液体表面の不安定性等があげられる。これらの現象は，個々に研究され理解が進んでは来たが，電気流体力学現象として総合的理解をめざした研究はいまだなされていない。

本研究は，これらの現象を自己組織化という観点から，総合的に理解しようとして行ったものである。自己組織現象は，平衡状態においても非平衡状態においても見られる。前者においては，強磁性体における磁区構造等があり，自由エネルギー最小状態に対応する。後者には，Bénard 対流の構造形成や B-Z 反応のような化学反応系の時間振動があり，散逸構造と呼ばれる。これらに対する熱力学的な理解は，現在模索の段階である。本研究は，現象自体，応用面，また熱力学上の問題として，荷電流体の自己組織現象をとりあげた。

電気流体力学系を支配する基礎方程式は，質量，運動量，また電荷の保存則とポアソン方程式である。現象は一般に様々な境界条件に支配されるが，これらは基本的ないくつかの境界条件のもとで調べる事により理解が進められると考え，3つの基本的境界条件をとりあげた。第一にア

スペクトル比（柱状容器の直径 / 長さ） $Ar$  が1 に比べて非常に小さい場合（細管系），第二にアスペクト比  $Ar$  が1 に比べて非常に大きい場合（薄い円盤状容器），第三に， $Ar \gg 1$  で，しかも，自由表面を有する場合をとりあげ，おのおののジオメトリーにおいて，流体が単極性電荷を注入された場合に呈する現象を実験的，理論的に検討し，それぞれの場合に現われる自己組織現象の総合的理解をめざして熱力学的観点から議論した。

## 第二章 電気流体における時間的不安定性と振動現象

本章では，アスペクト比  $Ar \ll 1$  の場合（細管系）すなわち流体運動の自由度を軸方向のみに認める擬一次元系を扱った。管内に，軸に垂直に二枚の格子状電極をおいて軸方向電界を形成し，流体に一方の電極から一様に単極性電荷を注入した場合，まず理論的に平均流速と管両端の圧力差の間の静特性を調べた。その結果，

ある電圧以上で電圧と電流，および圧力差と流れの間に負性特性領域が現れる事が判明し，さらにこの細管系を自由液面レベルのU字管の水平部に用いた場合，レベル ( $z$ )，および電流 ( $j_m$ ) は，ある閾電圧以上で非線形振動状態に入る事が示された。この事を実験的に調べるため，U字管内の脱イオンした分極性液体（ニトロベンゼン）に対し，同極性イオン交換物質をコーティングした電極対を用いて単極性電荷を注入すると，ある閾電圧以上でレベル

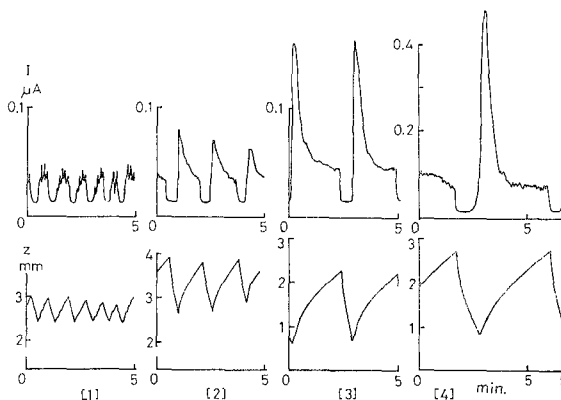


図1 振動波形，(上)電流，(下)レベル  
 $a = 0.27 \text{ mm}$ ， $4 \text{ kV}$

と電流が非線形振動状態に入る事を確認した。(図1) 電流振幅の絶対値を除いては，定量的に理論と実験が一致した。本系のような空間的に一様な系において，時間的な自己組織が生ずる事を理論的，実験的に示す事ができた。さらに振動状態における平均電荷輸送効率は，静止状態に比べて増大する事もあわせて確認した。

## 第三章 電気流体における空間的不安定性と構造

本章では，アスペクト比  $Ar \gg 1$  の場合（薄い盤状容器）すなわち軸方向の運動の自由度を抑制した擬二次元系を扱った。このジオメトリーは，液晶の電気対流現象や，対流構造の逐次相転移現象に現われる。薄い絶縁液体層に垂直に一様電界を加え，一方の面から一様に単極性電荷を注入するとき，層間電圧がある値を越えると静止伝導状態が不安定化し，規則的対流構造を形成する。これはFelici不安定性と呼ばれ，最近実験的，理論的に研究されてきた。実験的には対流開始の臨界点や，臨界点近傍での電流電圧特性上にヒステリシスの存在が示されており，一方，理論的には線形解析により臨界条件が得られ，またヒステリシスは，平均場近似を用いた非線形

解析により説明されるようになった。このようにある程度理解は進んで来たが、静止状態から対流状態への発展過程、あるいは定常対流構造の性質、またその安定性に対しては平均場近似のような解析法では解明できない。本章では、流体と電荷の運動に対する微分方程式を有限差分方程式に変換し、非線形性を十分とり入れた解析を行った。

その結果、対流開始電圧の数倍の電圧を加えた条件下において、

1. 安定な多重定常対流状態が存在する事
2. 各状態に対する電荷輸送効率や対流の最大流速は、ある対流構造の波長において最大となる事

が示された。このように多重安定定常状態がある場合には、その相対的安定性が問題となってくる。そのため、各状態の外乱に対する安定性を調べた。その結果、

3. 準安定な対流構造の中で最も安定な構造の波長は、電荷輸送効率（あるいはエントロピー生成）が最大となる対流構造の波長と計算精度内で同じ領域にある事

が示された。図2は定常電流値を形成されたロール数に対して示したもので、矢印は外乱前の状態と外乱後の状態を示す。

このように、本章で扱ったジオメトリーでは、空間的自己組織現象が起こるが、それは唯一解ではなく初期条件によって異なる多重解を持っている。その中で、電荷輸送効率の大きい構造が相対的により安定である傾向が示された。

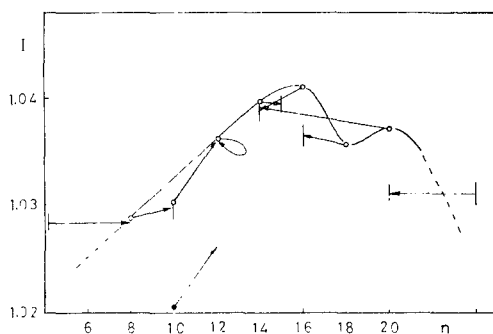


図2 対流構造の外乱による遷移

#### 第四章 荷電流体表面における自己組織現象

本章では、アスペクト比  $Ar \gg 1$  で、自由表面を有する系を扱う。bulk 内部の対流現象、あるいは表面の不安定性は調べられてはいるが、自由表面を通しての電荷輸送の研究は少く、その際生じる現象自体良く知られていない。本章では、液相に垂直に一様電界を加え、一様に自由表面から液層内部へ単極性電荷を注入する場合の液体表面のふるまい、および電荷輸送の形態の変化を実験的に調べ、理論的検討を行った。

実験は、コロナ triode 系を用いて、正イオンを絶縁液体表面に供給したときの、液体層を流れる電流と電圧の特性、表面形状の変化を調べ、レーザー・ドップラー法による流速測定を行った。その結果、

1. ある閾電圧以上で表面が規則的に変形し、空間構造を作る。(図3) このとき、電流および流速の電圧に対する変化率に顕著な変化は見られない事、すなわち平衡構造の形成
2. ある閾電圧以上で、Felici 対流が発生する事
3. ある閾電圧以上で、電氣的応力が表面張力に優って、表面破壊 (Taylor 不安定性) が起

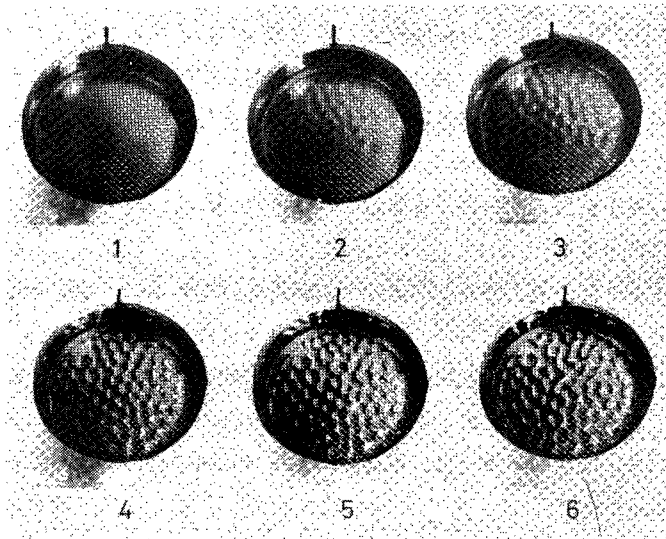


図3 表面構造の加速電圧依存性

こり、それに伴う電荷輸送効率の増大が見られた事が示された。理論的には、1.の現象は平衡構造の形成と考えられる事から、表面電荷の保存とポテンシャル流を仮定して、表面の線形安定性解析を行った。その結果、表面波動に対する分散関係を得たが、特に二つの極限において表面電荷の影響を明示すると、

4. 表面電荷の移動度が無限大の極限では、表面波動の分散方程式は

$$\omega^2 = \frac{D}{\rho} \left( \rho g + k^2 \tau - \frac{\sigma_0^2}{\sqrt{2} \epsilon_2^2 c_1} |k| \right)$$

$$D = k \tanh kd, \quad c_1 = \text{const}$$

$g$ ,  $\tau$ ,  $\sigma_0$ ,  $d$  はそれぞれ重力定数、表面張力、表面電荷密度および液厚である。表面電荷の存在は、表面波動を softening し、ある値以上になると波数  $k$  の波動は凍結状態になる。その臨界条件および臨界波数  $k_c$  は、

$$\sigma_0 \geq 2\sqrt{2} c_1 \epsilon_2^2 \sqrt{\rho g \tau}, \quad k_c = \sqrt{\rho g / \tau}$$

である。

5. 表面電荷の移動度が0の極限では、

$$\omega^2 = \frac{1}{\rho} \left\{ (\rho g + k^2 \tau) D + \frac{\sigma_0^2}{\epsilon_2} k^2 \right\}$$

$\epsilon_2$  は液体の誘電率である。表面電荷の存在は、表面活動を hardening する。すなわち振動数、および伝播速度を増大させる。

この理論によって実験的に見られた表面構造の生じる不安定性は、理論的に説明する事ができた。2.および3.の現象に対する理解は十分ではないが、自由表面の存在が電荷輸送過程において対流構造を安定化させるように働く事をコメントしておく。

## 第五章 熱力学的議論

自然界において現われる自己組織現象の中で、平衡構造は自由エネルギー最小の状態に対応すると理解されるが、散逸構造に対する理解は最近になって進んできた。Glansdorff と Prigogine は平衡から遠く離れた状態への熱力学の拡張を行い、非平衡基準状態（しかし局所平衡が言える）の微小擾乱に対する安定性の議論を可能にした。本論文第三章で示したような、安定な多重定常

状態が存在する場合には、一つを基準状態に選ぶとき、それは有限の大きさの擾乱に対し不安定となりうる。Glansdorff と Prigogine の方法では、このような多重定常状態間の相対的安定性を議論する事ができない。Sawada はこの問題に対し、熱力学的な仮説を提唱している。本研究は、多重定常状態間の安定性と電荷輸送効率、あるいはエントロピー生成最大の状態とは、強い関連がある事を示し、Sawada の仮説を支持する結果となった。他の散逸構造、すなわち時間振動系に対しては、今のところ統一的な事は言えない。これらは、まだ確立されていない領域であり、今後の課題である。

## 第六章 結 論

以上のように、荷電流体の3種の異なる自己組織現象、すなわち、1. 時間的散逸構造、2. 空間的散逸構造、3. 平衡構造 を扱って、それらの存在、発生原因、構造の性質や安定性を明らかにする事ができ、電気流体における様々な現象を理解する基礎的知見を得た。また空間的定常散逸構造に対して基本的と考えられる性質をとりあげて議論を行い、今後の課題を示した。

## 審 査 結 果 の 要 旨

流体の電氣的制御の研究は、イオンドラッグポンピングやインクジェットプリンティング等の工学的な応用面だけでなく、生体膜のイオン透過機構等に現われる能動特性ともかかわりを持つ重要な分野である。この様な分野での個々の現象についてはある程度の理解は得られているが、荷電流体が持つ非線形性のために統一的な観点からの解明は試みられていなかった。著者は、種々の形状内に閉じこめられた絶縁性液体に単極性電荷を注入した際、臨界電圧以上で生じる時間的振動現象、空間的定常構造、表面波の凍結等様々な非線形現象をとりあげ、これ等の現象を平衡系と非平衡系の自己組織現象として総合的に研究することを試みた。本論文はこれ等の成果をまとめたもので全編6章より成る。

第1章は緒論であり、本研究の電気流体力学のおよび熱力学的問題としての位置づけを示している。第2章ではアスペクト比（管の径／管の長さ）が1に較べて充分小さい場合について行った解析と実験について述べている。即ち、電荷密度がある値以上の場合、一定電圧条件では圧力差と物質流の間に、また一定圧力差条件では電圧と電流の間に負性特性が生じること、従って圧力条件を自由にした場合には物質流と電流が共に非線形振動することを理論的に示し、このことをニトロベンゼンを入れたU字管での実験で検証している。またこの現象を生体膜でのイオン浸透現象との相違点を明らかにしている。

第3章では、アスペクト比が1より大きい場合について行った数値計算の結果を述べている。この場合は、初期条件の違いによって数多くの準安定定常構造をもつ電気対流モードが出現すること、また1つの準安定状態に外乱を与えると他の準安定状態に遷移するが終状態として最も安定なモードは、電荷輸送効率最大のモードにはほぼ一致していることを示している。これ等の結果は非平衡構造の相対的安定性に関する仮説の存在を裏付ける実例を示したもので大きな成果である。

第4章では、荷電液体表面の安定性について述べている。即ち、弱い電界のもとでは、表面波の凍結による電荷2次元結晶化が起きることを示し、この条件を理論的に導出し、実験による検証を行なっている。また強い電界下では、表面の破壊に伴ない電荷輸送量が変化することを述べている。第5章では、荷電流体系を熱力学的観点から議論している。即ち、非平衡系の構造安定性に対するプリゴジン理論の不備を指摘し、定常多重準安定系の相対安定性の考察に対して示唆を与えている。第6章は結論である。

以上要するに、本論文は荷電流体系の自己組織現象を理論的及び実験的に研究し、総合的な観点を示したもので、電子工学、制御工学に資するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。